

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

Кафедра физики

М.В. Головкина

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
НАНОТЕХНОЛОГИЙ,
ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ**

Сборник задач

Самара - 2017

ББК 22.37
Г24
УДК 539.21

Рекомендовано к изданию методическим советом ПГУТИ, протокол № 43 от 10.03.2017 г.

Головкина, М.В. Физические основы нанотехнологий, фотоники и оптоинформатики: сборник задач / М.В. Головкина. –Самара: ПГУТИ, 2017. -30 с.

Сборник задач рассчитан на магистрантов первого года обучения направления 12.04.03 "Фотоника и оптоинформатика" и разработан в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 12.04.03 Фотоника и оптоинформатика (уровень магистратуры) от 30.11.2014.

Для магистрантов, аспирантов, изучающих вопросы оптической связи, а также для инженерно-технических работников.

© Головкина М.В., 2017

Содержание

| | |
|---|----|
| Введение..... | 4 |
| Тема 1. Особенности физических взаимодействий в наномасштабе. Уравнение Шредингера..... | 5 |
| Тема 2. Потенциальная яма. Потенциальный барьер..... | 6 |
| Тема 3. Плотность состояний..... | 8 |
| Тема 4. Квантово-размерные структуры..... | 9 |
| Тема 5. Блоховские волны..... | 14 |
| Тема 6 Фононы. Квантовый конфайнмент..... | 15 |
| Тема 7. Квазичастицы..... | 18 |
| Тема 8. Теория Друде. Плазмоны..... | 18 |
| Список литературы..... | 22 |
| Глоссарий..... | 23 |

Введение

Сборник задач по дисциплине «Физические основы нанотехнологий, фотоники и оптоинформатики», рассчитан на магистрантов, обучающихся в рамках магистерской программы по направлению «Фотоника и оптоинформатика». Задачи и упражнения по данной дисциплине помогают более полно усвоить теоретический материал, посвященный особенностям распространения света в ограниченных наноструктурах, вопросам размерного квантования, приводящим к существенному изменению спектральных характеристик и появлению новых свойств, которые не могут наблюдаться у природных материалов, элементам наноплазмоники, а также вопросам практического применения наноструктур.

Теоретический материал, необходимый для решения задач в представленном сборнике, изложен в учебном пособии Головкиной М.В. Физические основы нанотехнологий, фотоники и оптоинформатики, –Самара: ПГУТИ, 2017. -140 с. Сборник задач рассчитан на читателя, владеющего математическим анализом, квантовой механикой и физикой твердого тела в объеме, изучаемом в технических университетах, а также знаниями оптической физики и основ оптоинформатики. В свою очередь, знания, полученные в рамках данного курса, используются при изучении курсов по нанооптике, фемтосекундной оптике и фемтотехнологиям, оптическим материалам фотоники и оптоинформатики.

Тема 1. Особенности физических взаимодействий в наномасштабе. Уравнение Шредингера

- 1.1 Определить длину волны де-Бройля, характеризующую волновые свойства электрона, если его скорость $v=1\text{Мм/с}$.
- 1.2 Какую ускоряющую разность потенциалов U должен пройти электрон, чтобы его длина волны де-Бройля была равна $0,1\text{ нм}$?
- 1.3 Во сколько раз изменится длина волны свободного электрона, если его скорость увеличится в 3 раза?
- 1.4 Рассмотреть электрон и протон, движущиеся с одинаковой скоростью 10^4 м/с . Во сколько раз отличаются длины волн де-Бройля для электрона и протона?
- 1.5 Будет ли изменяться длина волны де-Бройля частицы, если частица попадет в потенциальное поле?
- 1.6 Найти длину волны де-Бройля для электрона, находящегося в атоме водорода в основном состоянии.
- 1.7 Найти длину волны де-Бройля для электрона, находящегося в атоме водорода на второй орбите.
- 1.8 Запишите уравнение Шредингера для свободного электрона.
- 1.9 Запишите уравнение Шредингера для электрона, находящегося в атоме водорода.
- 1.10 Прибор зарегистрировал скорость распространения электромагнитного импульса. Какую скорость зарегистрировал прибор – фазовую или групповую?
- 1.11 Можно ли измерить фазовую скорость?
- 1.12 Волновой пакет образован двумя плоскими монохроматическими волнами:
$$\xi_1(x, t) = \cos(1002t - 3x)$$
$$\xi_2(x, t) = \cos(1003t - 3,01x)$$
. Определить фазовые скорости v_1 и v_2 каждой волны и групповую скорость волнового пакета $v_{гр}$.
- 1.13 Построить дисперсионные характеристики
а) для электрона,

- б) для частицы с эффективной массой $m_{\text{эф}}=2m_e$.
- 1.14 Построить дисперсионные характеристики для электромагнитных волн (фотонов), распространяющихся в
- вакууме,
 - чистом кварце,
 - стекле
- Примечание: рассмотреть диапазон частот, в пределах которого показатель преломления среды остается постоянным.

Тема 2. Потенциальная яма. Потенциальный барьер

- 2.1. Что такое собственные функции?
- 2.2. Вывести формулу для расчета расстояния между соседними энергетическими уровнями в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками.
- 2.3. Найти расстояние между соседними энергетическими уровнями
 - а) для свободного электрона в металле. Считать, что электрон находится в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Размеры потенциальной ямы оценить самостоятельно, считая их равными размеру куска металла,
 - б) для электрона в атоме. Сравнить результаты, полученные в а) и б), сделать выводы.
- 2.4. Изобразить на графике вид первых четырех собственных функций, описывающих состояние электрона в бесконечно глубокой потенциальной яме шириной L . Изобразить на графике вид функции $|\psi(x)|^2$.
- 2.5. Что такое основное состояние?
- 2.6. Рассмотреть одномерную потенциальную яму шириной l . Найти вероятность того, что электрон в состоянии с $n=2$
 - а) находится в точке с координатой $x=l/2$.

- б) находится в точке с координатой $x=l/4$.
- 2.7. Частица в потенциальной яме шириной L находится в возбужденном состоянии ($n=2$). Определить, в каких точках интервала ($0 < x < L$) плотность вероятности $|\psi(x)|^2$ нахождения частицы максимальна и минимальна.
- 2.8. Электрон находится в основном состоянии в потенциальной яме шириной L . Какова вероятность нахождения частицы 1) в средней трети ямы, 2) в крайней трети ямы?
- 2.9. Электрон находится в первом возбужденном состоянии в потенциальной яме шириной L . Какова вероятность нахождения частицы 1) в средней трети ямы, 2) в крайней трети ямы?
- 2.10. Электрон находится в потенциальной яме шириной L . вычислить вероятность нахождения электрона на первом энергетическом уровне в интервале $l/4$, равноудаленном от стенок ямы.
- 2.11. Перечислите основные свойства энергетического спектра электрона в квантовой яме.
- 2.12. Найти длину волны фотона, испускаемого при переходе электрона с третьего на первый уровень в бесконечно глубокой квантовой яме
- а) толщиной 15 нм.
 б) толщиной 5 нм.
- Сравнить результаты, полученные в а) и б), сделать выводы.
- 2.13. Что такое квантовая яма, квантовая проволока, квантовая точка?
- 2.14. Что такое размерное квантование?
- 2.15. В чем заключается квантование энергии? Поясните возникновение дискретного спектра энергии электрона в атоме и возникновение энергетических зон в кристалле.
- 2.16. Рассмотреть одномерную потенциальную яму шириной l .
1. Найти вероятность того, что электрон в состоянии с $n=2$
- а. находится в точке с координатой $x=l/2$.
 б. находится в точке с координатой $x=l/4$.

- 2.17. Найти расстояние между соседними энергетическими уровнями
- а) для свободного электрона в металле. Считать, что электрон находится в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Размеры потенциальной ямы оценить самостоятельно, считая их равными размеру куска металла,
 - б) для электрона в атоме кремния. Сравнить результаты, полученные в а) и б), сделать выводы.
- 2.18. Перечислите основные свойства энергетического спектра электрона в квантовой яме.
- 2.19. Что такое размерное квантование?
- 2.20. Что такое потенциальный барьер? Приведите пример.
- 2.21. От чего зависит коэффициент прохождения через потенциальный барьер?
- 2.22. Где применяется туннельный эффект?
- 2.23. Рассмотреть прохождение электрона через потенциальный барьер прямоугольной формы. Определите вероятность, того что электрон туннелирует на расстояние 0.1 нм, если разность энергий $U_0 - E = 1$ эВ . Рассчитайте разность энергий (в эВ и кДж/моль), при которой электрон сможет туннелировать на расстояние 1 нм с вероятностью 1%.

Тема 3. Плотность состояний

- 3.1. Построить дисперсионную кривую для электромагнитной волны в вакууме.
- 3.2. Построить дисперсионную кривую для фотона в вакууме.
- 3.3. Построить дисперсионную кривую для свободного электрона.
- 3.4. Вывести формулу для расчета плотности состояний $D_1(k)$ в одномерном и $D_2(k)$ двухмерном случае для частицы массой m .

- 3.5. Сравните уравнение Гельмгольца и уравнение Шредингера для стационарных состояний. Выпишите сходства и различия.
- 3.6. Зная выражение для расчета плотности мод для трехмерного случая $D_3(k)$, получить для частицы массой m зависимость $D_3(E)$ от энергии E и $D_3(p)$ от импульса p .
- 3.7. Начертить графики зависимости плотности состояний для электромагнитных волн и для электронов в трехмерном случае (Для электронов строить графики $D_3(k)$, $D_3(E)$ и $D_3(p)$).
- 3.8. Получить оценку предельной толщины пленки, при которой возможно наблюдение квантово-размерных явлений, если подвижность электронов в пленке 10^4 см²/(В·с).
- 3.9. Сколько квантовых точек CdSe может уместиться на острие иглы атомно-силового микроскопа?

Тема 4. Квантово-размерные структуры

4.1. Энергетические схемы некоторых гетероструктур представлены на рисунке 1.1.

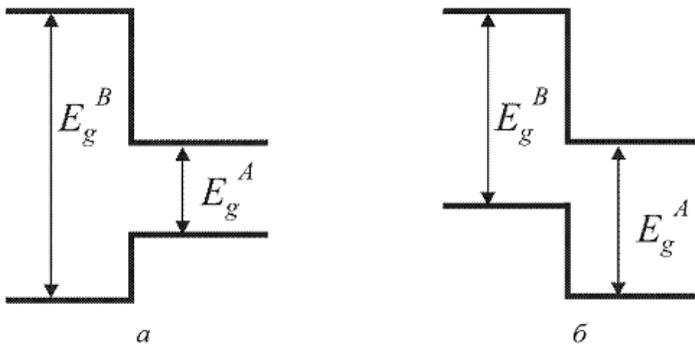


Рис. 1.1. Зонная схема одиночного гетероперехода типа I (a) и типа II (б)

Перерисовать в тетрадь зонную диаграмму 1.1 (а). Показать на рисунке (подписать с использованием стрелок), зону проводимости, дно зоны проводимости (E_c), валентную зону, потолок валентной зоны (E_v), запрещенную зону. Указать, где широкозонный полупроводник, где узкозонный. Подписать, что из себя представляет данная структура: потенциальную яму или потенциальный барьер. Изобразить схематически, где находятся носители заряда (какие носители?) и как они отражаются от стенок ямы или барьера.

4.2. На рис. 1.2 изображен двойной гетеропереход.

На рис. 1.2 изображен двойной гетеропереход.

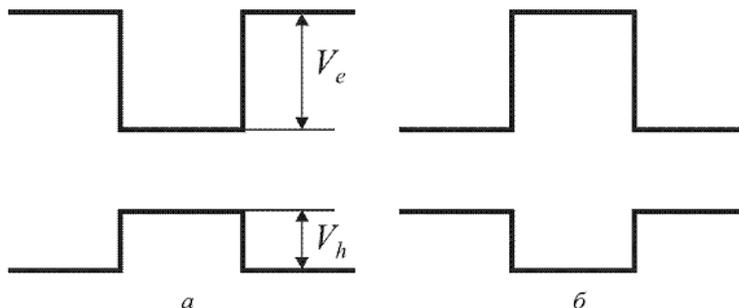
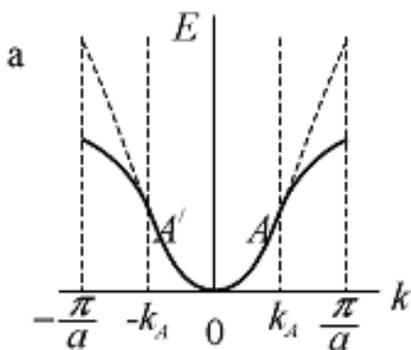


Рис. 1.2

Перерисовать в тетрадь зонную диаграмму 1.2 (а). Показать на рисунке (подписать с использованием стрелок), зону проводимости, дно зоны проводимости (E_c), валентную зону, потолок валентной зоны (E_v), запрещенную зону. Указать, где широкозонный полупроводник, где узкозонный. Подписать, что из себя представляет данная структура: потенциальную яму или потенциальный барьер. Изобразить схематически, где находятся носители заряда (какие носители?) и как они отражаются от стенок ямы или барьера.

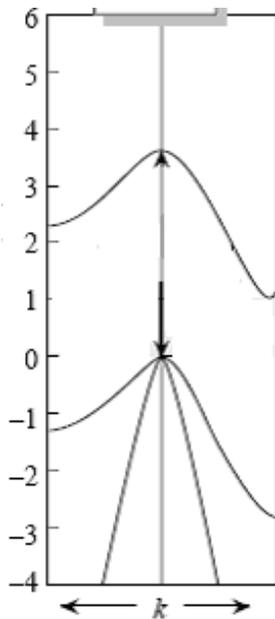
4.3 Перерисовать в тетрадь зонную диаграмму 1.2 (б). Показать на рисунке (подписать с использованием стрелок), зону проводимости, дно зоны проводимости (E_c), валентную зону, потолок валентной зоны (E_v), запрещенную зону. Указать, где широкозонный полупроводник, где узкозонный. Подписать, что из себя представляет данная структура: потенциальную яму или потенциальный барьер. Изобразить схематически, где находятся носители заряда (какие носители?) и как они отражаются от стенок ямы или барьера.

4.4 Исследовать дисперсионную кривую частицы, построенную для первой зоны Бриллюэна. Построить график зависимости эффективной массы данной частицы m^* от k .



4.5. Исследовать зонную структуру кремния Si.

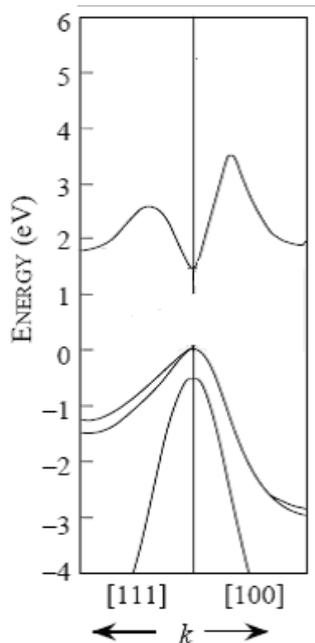
- определить, каким полупроводником является кремний: прямозонным или непрямозонным,
- найти ширину запрещенной зоны
- указать зону тяжелых и легких дырок.



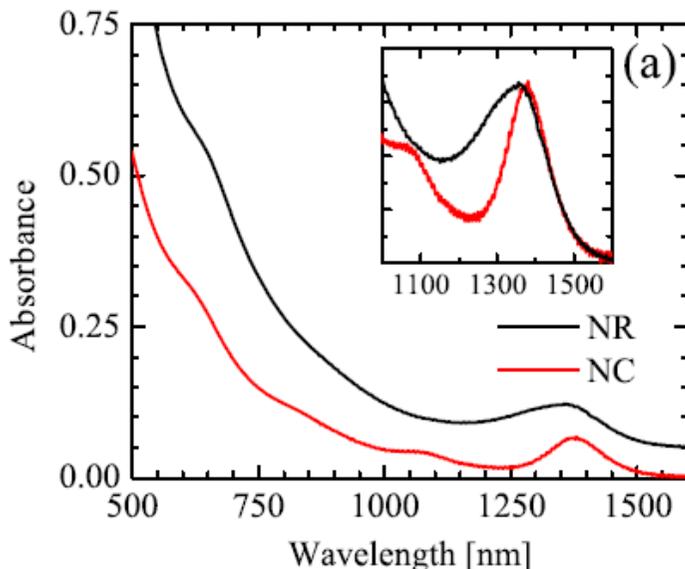
Si

- 4.6.** Исследовать зонную структуру арсенида галлия GaAs.
- определить, каким полупроводником является рассматриваемый материал: прямозонным или непрямозонным,
 - найти ширину запрещенной зоны,
 - найти энергию расщепления зоны Δ .

GaAs



4.7. Исследовать спектры поглощения для наностержней и наноточек

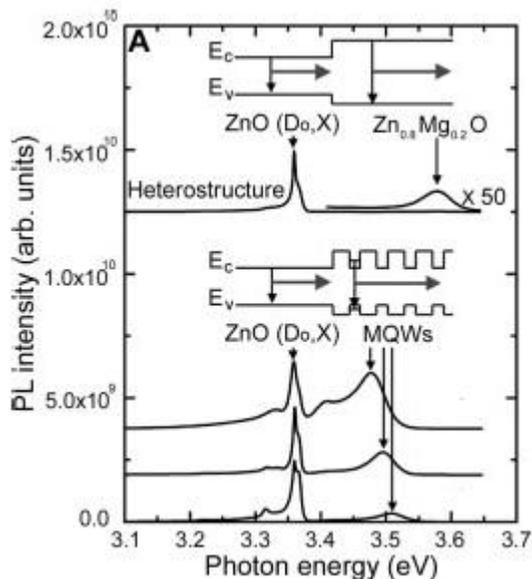


Задание:

1. Сравнить спектры испускания для наностержней и наноточек. Выписать различия.
2. Оценить длину волны, соответствующую переходам между разрешенным уровням энергии.
3. Найти разность энергий ΔE между соседними энергетическими уровнями (для какой кривой это возможно?). Сравнить с шириной запрещенной зоны объемного материала.
4. Оценить значение эффективной массы электрона. Сравнить со значением эффективной массы для объемного материала.

4.8 Рассмотреть спектр люминесценции для наностержней $ZnO/Zn_{0,8}Mg_{0,2}O$. Нижние три кривые соответствуют

спектрам наностержней с диаметрами 1,7 нм, 1,1 нм, 2,5 нм. Определить, какие кривые соответствуют данным значениям диаметров.



Тема 5. Блоховские волны

- 5.1 Что такое дисперсионное уравнение? Дисперсионная характеристика?
- 5.2 Сформулируйте теорему Флоке.
- 5.3 Сформулируйте теорему Блоха.
- 5.4 Что такое блоховские волны?
- 5.5 Что такое зоны Бриллюэна?
- 5.6 Как нарисовать дисперсионные характеристики, приведенные к первой зоне Бриллюэна?

5.7 Что такое эффективная масса? Чем она отличается от массы покоя?

5.8 Может ли эффективная масса быть отрицательной?

5.9 Из каких экспериментов можно найти эффективную массу?

Тема 6 Фононы. Квантовый конфайнмент

6.1 Рассмотреть дисперсионные зависимости для фононов в бесконечной одномерной цепочке, элементарная ячейка которой содержит две различные частицы. Найти значения максимальной и минимальной частоты для акустической и оптической ветви. Отметить эти значения на графике дисперсионных зависимостей для первой зоны Бриллюэна .

6.2 Построить дисперсионные зависимости для фононов в одномерной цепочке, элементарная ячейка которой содержит две различные частицы. Параметры: $m_1=2$, $m_2=5$, $\beta=35000$. Отметить на графике запрещенные и разрешенные зоны.

6.3 Теоретическая часть. Квантово-размерные эффекты проявляются и в колебательных спектрах квантовых точек. В колебательных спектрах нанокристаллов эффекты размерного квантования проявляются как в области акустических, так и оптических колебаний. Небольшой объем кристаллической структуры приводит к ярко выраженному квантованию колебательных состояний в зоне Бриллюэна, а малость нанообразований является фактором, приводящим к нарушению правил отбора по квазиимпульсу. Поэтому для широкозонного решеточного колебания возможно экспериментальное наблюдение отдельных колебательных мод. Полупроводниковые нанокристаллы обычно исследуются в стеклянной матрице, в которой концентрация полупроводников группы A_2B_6 , не превышает 0,1...1,5 %.

При рассмотрении колебательного спектра нанообъектов обычно используют макроскопическое или континуальное приближение, которое рассматривает кристалл как непрерывную среду. Это приближение включает в себя три различных модели: модель упругого, механического и диэлектрического континуума. Модель упругого континуума хорошо подходит для описания низкочастотных (акустических) колебаний.

Модель упругого континуума

Континуальное приближение является подходом феноменологическим. Задача о собственных колебаниях однородного упругого тела сферической формы со свободной границей впервые была поставлена и решена Лэмбом. Лэмб получил, что основная мода колебаний сферы, соответствующая полносимметричному колебанию, соответствующему попеременному сжатию и расширению сферы, имеет частоту, которая определяется упругой постоянной среды C_{11} , плотностью среды ρ и радиусом сферы R :

$$\omega = \frac{0,84}{2R} \sqrt{\frac{C_{11}}{\rho}} \quad \text{или} \quad \omega = \frac{\beta v_l}{2Rc}$$

Во втором выражении c - скорость света, v_l - продольная скорость звука, β - коэффициент, зависящий от соотношений продольной и поперечной скорости звука в полупроводнике.

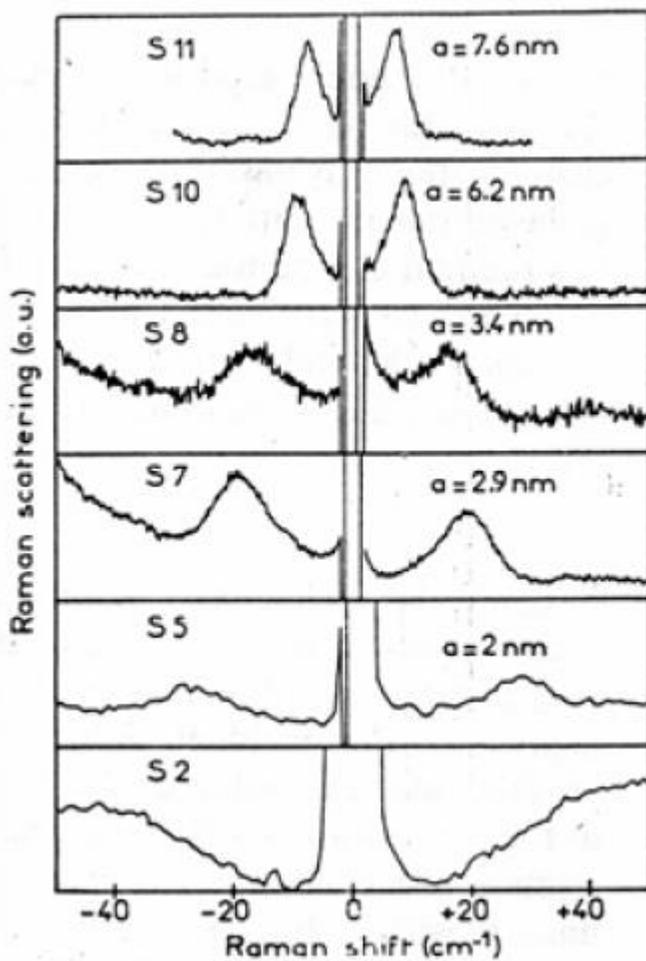


Рис.6.1. Стоксовое и антистоксовое низкочастотное рамановское рассеяние для стекол, содержащих $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ нанокристаллы с разными радиусами a , указанными на рисунке.

Задание.

Используя экспериментальный спектр рамановского рассеяния для стекол с нанокристаллами $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$ (рис.1), показать правильность формулы Лэмба для расчета частоты колебаний основной моды сферической наночастицы. Построить график (какой?). На графике представить экспериментальные результаты и теоретическую кривую. Сделать вывод.

Примечание: расчеты дополнить необходимыми словесными пояснениями.

Тема 7. Квазичастицы

- 7.1. Что такое квазичастица? Какие квазичастицы вы знаете?
- 7.2. Что такое дисперсионная кривая?
- 7.3. Что такое дырка с точки зрения зонной теории? Какой знак у энергии дырки? Какой знак у эффективной массы дырки?
- 7.4. Что такое фонон?
- 7.5. Чем отличаются оптические фононы от акустических?
- 7.6. Что такое экситон?
- 7.7. Что такое экситон Ванье-Мотта? Экситон Френкеля? Какие экситоны наблюдаются в полупроводниках?
- 7.8. Как влияют экситоны на спектр поглощения полупроводника?

Тема 8. Теория Друде. Плазмоны

- 8.1 Записать дисперсионное соотношение для поперечных волн, возникающих в плазме (имеется в виду холодная плазма в металле, описываемая теорией Друде). Иногда эти волны называют объемными плазмонами.
- 8.2 Найти фазовую и групповую скорость для поперечных электромагнитных волн в металле (для волн из задачи 8.1)
- 8.3. Построить дисперсионные характеристики для
 - а) объемных плазмонов,
 - б) для поверхностных плазмонов на границе воздух – металл,

Все на одном графике. Дополнительно отметить дисперсионную кривую для свободного фотона в вакууме и дисперсионную характеристику для ленгмюровских (продольных) волн в объемном материале.

- 8.3. Вычислить длину свободного пробега электронов в меди (алюминии) при $T = 300\text{K}$, если удельное сопротивление меди при этой температуре равно $0.017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ (для алюминия $0.027 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$).
- 8.4. Рассчитать толщину скин-слоя для золота и серебра для микроволнового излучения, для оптических частот и для УФ-лучей.
- 8.5. Рассмотреть формулу для расчета диэлектрической проницаемости металла в рамках теории Друде с учетом мнимой части (см. лекции). Построить график зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости от частоты для золота или серебра (по заданию преподавателя).

Параметры Друде для благородных металлов Au, Ag и Cu. Низкочастотная проводимость σ и электронная плотность n_0 взяты из Kopitzki (1993), а эффективные массы m^* — из Johnson, Christy (1972)

| | Au | Ag | Cu |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|
| $n_0/\text{м}^{-3}$ | $5,90 \cdot 10^{28}$ | $5,76 \cdot 10^{28}$ | $8,45 \cdot 10^{28}$ |
| $\sigma/(\text{О} \cdot \text{м})^{-1}$ | $4,9 \cdot 10^7$ | $6,6 \cdot 10^7$ | $6,5 \cdot 10^7$ |
| m^*/m_e | 0,99 | 0,96 | 1,49 |
| $\omega_{pl}/\text{эВ}$ | 9,1 | 9,1 | 8,8 |
| $\tau/\text{фс}$ | 29 | 40 | 40 |

Параметры Дрude при оптических частотах для Au и Ag

| | Au | Ag | Au | Ag | Au | Ag |
|-------------------------|------------------|-----|-----------------|------|--------------|---------|
| $\omega_{pl}/\text{эВ}$ | 9,0 | 9,1 | 8,4 | 8,75 | 8–10 | 8,3–9,2 |
| $\tau / \text{фс}$ | 10 | 36 | 6–19 | 8,6 | 4–26 | 15–23 |
| ϵ_{∞} | 9,84 | 3,7 | 6,5–7,5 | 4,45 | | |
| Источник данных | Sonnichsen, 2001 | | Winsemius, 1972 | | Foiles, 1985 | |

8.6. Оценить предельный размер наночастиц из золота (меди), для которых потери сравнимы с потерями в объемном металле.

8.7.

а) Показать, что в случае комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ выполняются равенства:

$$n' = \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + \epsilon'}{2}}, \quad n'' = \sqrt{\frac{\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon'}{2}},$$

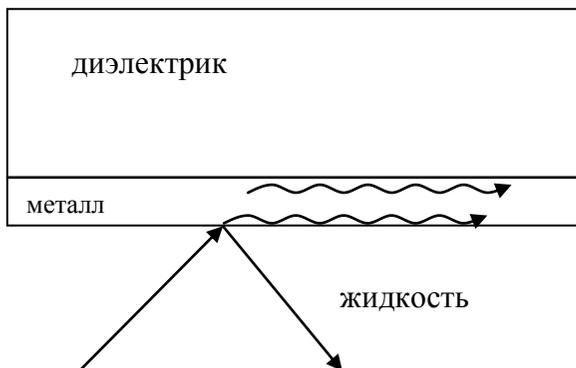
где n – показатель преломления.

б) показать, что для случая низких частот ($\epsilon' \ll \epsilon''$) выполняется равенство

$$n' \approx n'' \approx \sqrt{\frac{\epsilon''}{2}}.$$

8.7

Рассмотреть распространение поверхностных плазмонов в тонком слое металла.



Построить дисперсионные характеристики для поверхностных плазмонов, распространяющихся вдоль границы раздела жидкость – металл и вдоль границы раздела металл - диэлектрик. Жидкость: спирт, металл – серебро, диэлектрик – SiO_2 . Металл описывается в рамках теории Друде. Рассмотреть случай с потерями.

На графике отметить дополнительно дисперсионные кривые для «свободной» волны.

- 1) Оформить файлы. Сделать необходимые комментарии в файле.
- 2) Графики зарисовать в тетради. Записать все используемые формулы и параметры. Сделать выводы.

Список литературы

1. Головкина, М.В. Физические основы нанотехнологий, фотоники и оптоинформатики: сборник задач / М.В. Головкина. –Самара: ПГУТИ, 2017. -140 с.
2. Барыбин А. А. Электродинамика волноведущих структур. М.: Физматлит. 2007. 512 с.
3. Белов П. А., Беспалов В. Г., Васильев В. Н., Козлов С. А., Павлов А. В., Симовский К. Р., Шполянский Ю. А. Оптические процессоры: достижения и новые идеи. В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики. СПб. 2006. С. 6 - 36.
4. Борздов В.М., Жевняк О.Г., Комаров Ф.Ф., Галенчик В.О. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники. Минск: БГУ. 2007. 17 с.
5. Кардона М. Основы физики полупроводников. М.: Физматлит. 2002. 560 с.
6. Карпов С.В. Фононы в нанокристаллах. СПб.: Из-во СПбГУ. 2011. 48 С.
7. Майер С. А. Плазмоника: Теория и приложения. М.-Ижевск: РХД. 2011. 296 с.

Глоссарий

Блоховская волна - волновая функция частицы (обычно электрона), находящейся в периодическом потенциале. Названа в честь Феликса Блоха. Блоховская волна состоит из произведения плоской волны $e^{i \mathbf{k} \mathbf{r}}$ на некоторую периодическую функцию (блоховская функция) $u_k(\mathbf{r})$, имеющую ту же периодичность, что и потенциал:

$$\psi_k(\mathbf{r}) = e^{i \mathbf{k} \mathbf{r}} \cdot u_k(\mathbf{r}).$$

Гетероструктура - выращенная на подложке слоистая структура из различных полупроводников, в общем случае отличающихся шириной запрещённой зоны. Между двумя различными материалами формируется *гетеропереход*, на котором возможно формирование вырожденного двумерного электронного газа.

Гетеропереход - контакт двух различных по химическому составу полупроводников. На границе гетероперехода происходит изменение свойств полупроводникового материала: структуры энергетических зон, ширины запрещённой зоны, эффективных масс носителей заряда, их подвижности и т. д. Для получения идеальных монокристаллических гетеропереходов (без дефектов решётки и поверхностных состояний на границе раздела) необходимо, чтобы у полупроводников совпадали типы кристаллических решёток, их периоды (изопериодичность) и коэффициенты термического расширения.

Дисперсионное уравнение - соотношение, связывающее циклическую частоту ω и волновые векторы \mathbf{k} собственных гармонических волн в линейных однородных системах: непрерывных средах, волноводах, передающих линиях и др.

Квазичастица - понятие в квантовой механике, введение которого позволяет существенно упростить описание сложных квантовых систем со взаимодействием, таких как твердые тела и квантовые жидкости. *Квазичастица* - квант коллективного коле-

бания или возмущения многочастичной системы, обладающий определённой энергией и, как правило, импульсом. К квазичастицам относятся электроны в кристалле, дырки, фононы, экситоны, плазмоны, поляритоны.

Квантовая нить - структура в которой движение носителей ограничено по двум направлениям. Квантовая нить может быть выполнена из металла или полупроводника в виде нити или длинного стержня, поперечные размеры которого настолько малы, чтобы квантовые эффекты были существенными (поперечные размеры должны быть сравнимы с длиной волны де-Бройля для электронов (дырок)).

Квантовая точка (англ. quantum dot)- частица материала с малыми размерами (обычно 1–10 нм), в которой движение электрона ограничено во всех трех измерениях. Квантовой точкой может служить любой достаточно маленький кусочек металла или полупроводника. Размер квантовой точки должен быть настолько мал, чтобы квантовые эффекты были существенными.

Квантовая яма — это одномерная потенциальная яма, которая ограничивает подвижность частиц в одном измерении. Квантовой ямой может служить тонкий слой материала. Толщина квантовой ямы должна быть настолько мала, чтобы квантовые эффекты были существенными. Проявление квантовых эффектов становится существенным, если толщина квантовой ямы сравнима с длиной волны де-Бройля электронов (дырок).

Квантовый конфайнмент – ограничение элементарных возбуждений в квантово-размерных структурах (квантовых ямах, квантовых нитях, квантовых точках).

Литография - технология переноса рисунка с шаблона на конкретную поверхность (полимерную пластину, полупроводниковую подложку и т.д.) с помощью светового излучения (фотолитография), рентгеновского излучения (рентгенолитография), по-

тока электронов/ионов (электронно-лучевая/ионно-лучевая литография), а также непосредственно методами сканирующей зондовой микроскопии, атомной силовой микроскопии или контактной печати.

Метаматериал - искусственный композитный структурированный материал, электромагнитные свойства которого существенно отличаются от свойств компонентов, входящих в его состав, и определяются особым упорядочением и структурой компонентов (кольцеподобной, рулонной, проводной и т. д.).

Метод осаждения металлоорганических соединений из газообразной фазы MOCVD (Metalorganic Chemical Vapour Deposition) – эпитаксиальный рост материалов путем осаждения на подложку продуктов термического разложения (пиролиз) молекул органических газов, содержащих необходимые химические элементы.

Молекулярно-лучевая эпитаксия - эпитаксиальный рост в условиях сверхвысокого вакуума - наращивание на подложке монокристаллических слоев полупроводниковых веществ, заключающееся в осаждении испаренных компонентов на нагреваемую монокристаллическую подложку с одновременным взаимодействием между ними. Позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования.

Наноструктура - совокупность наноразмерных объектов искусственного или естественного происхождения, свойства которой определяются не только размером структурных элементов, но и их взаимным расположением в пространстве.

Нанотрубка, углеродная - полая цилиндрическая структура диаметром от десятых до нескольких десятков нм и длиной от одного до нескольких сотен микрометров и более, образованная

атомами углерода и представляющая собой свернутую в цилиндр графеновую плоскость. Нанотрубки обладают уникальными электрическими, магнитными, оптическими и механическими свойствами. В частности, УНТ на порядок прочнее стали. На основе нанотрубок создаются диоды и полевые транзисторы, сверхпрочные и сверхлегкие композиционные материалы. Нанотрубки используются в качестве игл в сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии, а также для создания полупроводниковых гетероструктур.

Наночастица - один из наиболее общих терминов для обозначения изолированных ультрадисперсных объектов, во многом дублирующий ранее известные термины (коллоидные частицы), но отличающийся от них чётко определёнными размерными границами. Размеры наночастицы составляют от 1 до 100 нм. Твёрдые наночастицы размером менее 1 нм обычно относят к кластерам, более 100 нм — к субмикронным частицам.

Плазменная частота - частота собственных продольных колебаний пространственного заряда в однородной плазме (в электронном газе) в отсутствие магнитного поля. Плазменная частота электронного газа в пренебрежении движением ионов равна

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n e^2}{\epsilon_0 m^*}}.$$

Здесь n - концентрация электронов, e - заряд, m^* - эффективная масса электронов. Выражение записано в системе СИ.

Плазмон - квазичастица, квант плазменных колебаний, которые представляют собой коллективные колебания свободного электронного газа. Плазмоны играют большую роль в оптических свойствах металлов. В большинстве металлов плазменная частота находится в ультрафиолетовой области спектра, делая их блестящими в видимом диапазоне. В легированных полупроводниках плазменная частота находится обычно в ультрафиолетовой области.

Плазмонный резонанс - возбуждение поверхностного плазмона внешней электромагнитной волной при совпадении частоты волны с резонансной частотой для поверхностного плазмона. Резонансная частота поверхностного плазмона зависит как от свойств

Поляритон - квазичастица, возникающая при взаимодействии фотонов и элементарных возбуждений среды. Взаимодействие электромагнитных волн с возбуждениями среды, приводящее к их связи, становится особенно сильным, когда одновременно их частоты и волновые векторы k совпадают (резонанс). В этой области образуются связанные волны, то есть поляритоны.

Поляритоны, образующиеся в результате взаимодействия фотонов с различными возбуждениями среды — оптическими фононами, экситонами, плазмонами и так далее, называют фоновыми поляритонами, экситонными поляритонами, плазмон-поляритонами.

Поверхностный плазмон – квант плазменных колебаний электронной подсистемы. Возникает на границе раздела двух сред в том случае, когда диэлектрическая проницаемость одной из сред меняет свой знак (например, на границе раздела металла и воздуха).

В случае взаимодействия поверхностного плазмона и фотона образуется составная квазичастица – поверхностный поляритон или плазмон-поляритон.

Фонон – квазичастица, представляющая собой квант колебательного движения атомов кристалла. Введен советским учёным Игорем Таммом.

Фотонная запрещенная зона (полная фотонная запрещенная зона). Из-за того, что показатель преломления периодически изменяется, в фотонном кристалле возникают разрешённые и запрещённые зоны для энергий фотонов (аналогично запрещенным и разрешенным зонам для полупроводников). Существова-

ние излучения с энергией фотонов, принадлежащей ФЗЗ в таких кристаллах, невозможно. В частности, излучение, спектр которого принадлежит ФЗЗ, извне в ФК не проникает, существовать в нем не может и полностью отражается от границы.

Фотонный кристалл - это материал, в котором показатель преломления периодически изменяется в одном, двух или трех пространственных направлениях. Соответственно различают одномерные, двумерные и трехмерные фотонные кристаллы.

Фотонные кристаллы демонстрируют наличие *фотонной запрещенной зоны*.

Фотонно-кристаллическое волокно - это оптическое волокно, оболочка которого имеет структуру двумерного фотонного кристалла. По физическому механизму удержания света в сердцевине волокна ФКВ можно разделить на два класса.

Первый класс образуют ФКВ, локализация света в сердцевине которых происходит благодаря зеркальному отражению от оболочки, обладающей фотонными запрещенными зонами (ФЗЗ). Особенно важно, что сердцевина ФКВ с ФЗЗ может быть полой, что позволяет на несколько порядков увеличить мощность вводимого в них излучения, уменьшить потери и нелинейные эффекты.

Механизм удержания света в ФКВ второго класса вполне традиционен для оптического волокна — полное внутреннее отражение. Однако в них используется новый принцип управления показателем преломления оболочки, основанный на его зависимости от структуры оболочки. Возможность управления показателем преломления оболочки позволяет создавать так называемые неограниченно одномодовые волокна. В них на любой длине волны распространяется только одна мода. Еще одна особенность ФКВ — существование одномодового режима в волокнах с большим диаметром сердцевины.

Фоторезист - свето- или рентгеночувствительный материал на полимерной основе, используемый для нанесения пленочного покрытия на подложку в литографическом процессе путем его

облучения (экспонирования) через маску с проекциями элементов электронной схемы и последующего проявления (травления в растворителе) так, что изображение схемы переносится на подложку.

Экситон - квазичастица, состоящая из электрона и дырки. Экситон представляет собой электронное возбуждение в диэлектрике или полупроводнике, мигрирующее по кристаллу и не связанное с переносом электрического заряда и массы. Экситон можно считать элементарной квазичастицей в тех явлениях, в которых он выступает как целое образование, не подвергающееся воздействиям, способным его разрушить.

Эпитаксия - это ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Различают гетероэпитаксию, когда вещества подложки и нарастающего кристалла различны (процесс возможен только для химически не взаимодействующих веществ, например так изготавливают интегральные преобразователи со структурой кремний на сапфире), и гомоэпитаксию, когда они одинаковы. Эпитаксия особенно легко осуществляется, если различие постоянных решёток не превышает 10 %.

Эффективная масса - динамическая масса частицы, которая появляется при движении частицы в периодическом потенциале кристалла. Можно показать, что электроны и дырки в кристалле двигаются в электрическом поле кристалла так, как если бы они свободно двигались в вакууме, но с некой эффективной массой. Эффективная масса находится по формуле,

$$m^* = \hbar^2 \cdot \left[\frac{d^2 \varepsilon}{dk^2} \right]^{-1}$$

где ε - энергия частицы, k - волновое число. Эффективную массу часто выражают единицах массы покоя электрона m_e .